

doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2012.04.026

铅挤压阻尼器对网壳结构的减振控制

杨明飞^{1,2} 徐赵东¹ 黄兴淮¹

(¹ 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

(² 安徽理工大学土木建筑学院, 淮南 232001)

摘要: 将具有良好耗能特性的铅挤压阻尼器加设到大跨空间网壳结构中, 通过 LS-DYNA 软件对结构进行了减振效果分析. 以施威德勒球壳为例, 分析了铅挤压阻尼器不同布置位置对大跨空间网壳结构减振效果的影响, 其中阻尼器的布置分别为交叉支撑布置、斜撑布置和混合支撑布置, 综合分析表明, 在混合支撑布置铅挤压阻尼器的条件下, 铅挤压阻尼器减振系统的减振效果最佳, 结构顶点位移被降低 60.0%. 同样在混合支撑布置铅挤压阻尼器的条件下, 通过使用 IDA 的分析方法研究了该减振系统对大跨空间网壳结构倒塌临界荷载的影响, 结果表明结构整体倒塌临界荷载提高了 0.33 倍.

关键词: 铅挤压阻尼器; 网壳结构; 动力分析; 振动控制; 位移时程响应

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2012)04-0713-06

Vibration control for reticulated shell structure with lead extrusion dampers

Yang Mingfei^{1,2} Xu Zhaodong¹ Huang Xinghuai¹

(¹ Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(² School of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The vibration control of long-span space reticulated shell structure incorporated with lead extrusion dampers with excellent energy dissipation was studied. The mathematic models on the structure with the dampers were established by using LS-DYNA software. Based on the dynamic analysis of the Schwedler reticulated shell structure, the influences of different damper arrangements on the effectiveness of the vibration control were investigated. The layouts of the dampers were the cross bracing arrangement, inclined bracing arrangement and mixed bracing arrangement, respectively. Comprehensive analysis results show that the vibration control effect of the lead extrusion damper system is optimal under the mixed bracing arrangement, and the vertex displacement response is reduced by 60.0%. Meanwhile, the influences on collapsed critical loads of the long-span space reticulated shell structure are also studied by IDA analysis under the mixed bracing arrangement of the lead extrusion dampers. The results show that the collapsed critical load increases 0.33 times compared to that without dampers.

Key words: lead extrusion damper; reticulated shell structure; dynamic analysis; vibration control; displacement time history response

大跨度空间结构技术的发展已经成为一个国家建筑水平的重要标志之一, 在国内也相继建成了举世瞩目的“鸟巢”、“水立方”等. 但大跨结构属于

柔性结构, 且阻尼比很低, 在动力荷载(如风和地震)作用下, 会发生较大的振动, 影响到结构的正常使用及安全. 因此, 国内外很多学者已经开始对

收稿日期: 2012-01-04. 作者简介: 杨明飞(1979—), 男, 博士生; 徐赵东(联系人), 男, 博士, 教授, 博士生导师, zhdxu@yahoo.com.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90915004)、江苏省普通高校研究生创新人才培养基金资助项目(CXLX_0132).

引文格式: 杨明飞, 徐赵东, 黄兴淮. 铅挤压阻尼器对网壳结构减振控制[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(4): 713-718. [doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2012.04.026]

大跨空间结构的减振控制进行研究^[1-2].

文献[3]对空间网壳结构 ER/MR 智能杆件减振系统进行了分析,提出了局域半主动控制策略;利用 ER/MR 智能阻尼器对地震反应半主动控制进行计算,证明了 ER/MR 智能杆件是一种不会失稳的控制装置;在结构上合理布置 ER/MR 智能杆件和合理选取 ER/MR 智能杆件的参数可获得较好的减震效果.文献[4]采用振型分解反应谱法对折板式网壳结构的动内力做了分析,计算了结构厚度和坡度等参数对动内力的影响;另外对用振型分解反应谱法和时程分析法计算的结构动内力作了比较;最后探讨了采用黏弹性支座减振系统对四肢腿折板式网壳结构的减震效果.文献[5-6]将黏弹阻尼器引入网壳结构,并且对网壳结构黏弹阻尼器减振系统进行了系统的理论和试验分析,结果表明黏弹阻尼器对大跨网壳结构的减振效果十分明显.文献[7-9]总结了大跨空间网壳结构的减振研究现状,对已经应用的减振系统进行了分析,认为网壳结构减振系统的开发是减振控制发展的趋势,并且提出了将来应着重需要解决的若干问题,为大跨网壳结构减振控制提供了研究基础.本文尝试利用铅挤压阻尼器减振系统来控制大跨网壳结构的地震响应,并对该减振系统在大跨空间网壳结构中的适用性进行了研究.

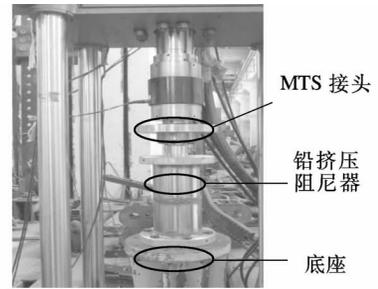
1 铅挤压阻尼器试验

由于金属铅具有面心立方体的特征,具有较高的延展性,同时在低应力作用下会发生变形并同时发生回复与再结晶,因此金属铅是一种优秀的阻尼耗能材料.在1976年,Robinson等根据铅受挤压产生塑性变形消耗能量的原理制造了铅挤压阻尼器^[10],并且预言该种类型的阻尼器将会有广泛的应用前景.文献[11]试验研究了铅挤压阻尼器的滞回特性,并且数值分析了抗震剪力墙结构应用铅挤压阻尼器减振系统的减振效果,结果表明铅挤压阻尼器系统明显降低了剪力墙结构的地震响应.本文以凸轴型铅挤压阻尼器为理论研究基础,对该种类型的阻尼器进行了相关的试验研究,图1是试件连接情况和阻尼器测试结果.试验结果表明:铅挤压阻尼器的滞回曲线饱满,具有很好的耗能能力,工作性能稳定且不受外界温度的影响.

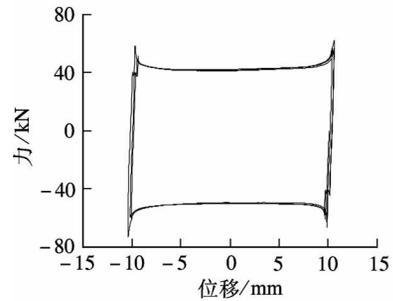
2 大跨空间网壳结构减振计算模型

附加铅挤压阻尼器减振系统的大跨网壳结构运动方程为

<http://journal.seu.edu.cn>



(a) 试件连接情况



(b) 10 mm 幅值滞回曲线

图1 铅挤压阻尼器试验结果

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = -MH_g\ddot{u}_{gg}(t) - F_{le} \quad (1)$$

式中, M 、 K 和 C 分别为大跨网壳结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $\ddot{X}(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 和 $X(t)$ 分别为网壳结构的加速度、速度和位移向量; H_g 是元素为1和0构成的惯性力指示向量,与加速度激励方向一致的元素为1,其余为0; $\ddot{u}_{gg}(t)$ 为地面运动加速度向量; F_{le} 为铅挤压阻尼器控制力向量.其中

$$F_{le}^{(i)} = K_{le}^{(i)} X(t) + C_{le}^{(i)} \dot{X}(t) \quad (2)$$

式中, $F_{le}^{(i)}$ 为第*i*号铅挤压阻尼器的等效出力; $K_{le}^{(i)}$ 和 $C_{le}^{(i)}$ 分别为第*i*号铅挤压阻尼器的等效刚度和等效阻尼.

将式(2)代入式(1),则运动方程改写为

$$M\ddot{X}(t) + (C + C_{le})\dot{X}(t) + (K + K_{le})X(t) = MH_g\ddot{u}_{gg}(t) \quad (3)$$

通过求解运动方程(3),可以得到网壳结构在各时刻的地震时程响应.

3 大跨空间网壳结构减振算例

3.1 LS-DYNA 软件参数

1) 材料模型 根据大跨网壳结构杆件的受力特点,杆件选择了 Beam161 梁单元,采用 Hughes-Liu 算法.材料模型选取了 LS-DYNA 提供的塑性随动强化模型.该模型的优势是可以考虑失效,通过在0(仅随动强化)或1(仅各项同性强化)间调整参数 β 来选择各项同性或随动强化,应变率使用 Cowper-Symonds 模型来导出,屈服应力为

$$\sigma_r = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C_0} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (4)$$

式中, σ_0 为常应变率的屈服应力; $\dot{\varepsilon}$ 为有效应变率; C_0, P 为应变率参数; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量,

$$E_p = \frac{E_{\tan} E}{E - E_{\tan}} \quad (5)$$

本文中组成网壳杆件钢材选用 Q235, 弹性模量 E 为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 失效时杆件的塑性应变为 0.05, 失效力可由式(4)进行计算.

2) 阻尼单元 由 LS-DYNA 提供的 COMB1165 单元如图 2(a) 所示.

通过 COMB1165 弹簧阻尼单元可以建立较复杂的弹簧阻尼系统. 弹簧和阻尼单元通过 2 个相同的节点 I 和 J 进行连接. 弹簧刚度 K' 不需要直接进行定义, 而是通过力-位移曲线的输入推导出各个时刻的刚度, 从而实现刚度的变化. 考虑网壳结构的自重及均布荷载条件, 本文选择了 300 kN 的铅挤压阻尼器, 阻尼器中的铅发生流动前有 2 mm 的塑性位移, 力-位移曲线如图 2(b) 所示. 通过试验结果和数值分析, 采用等效阻尼 $C_v = 200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 将 24 个铅挤压阻尼器分 3 种不同的布置方式排布于

大跨空间网壳结构中, 以便对结构进行减振分析.

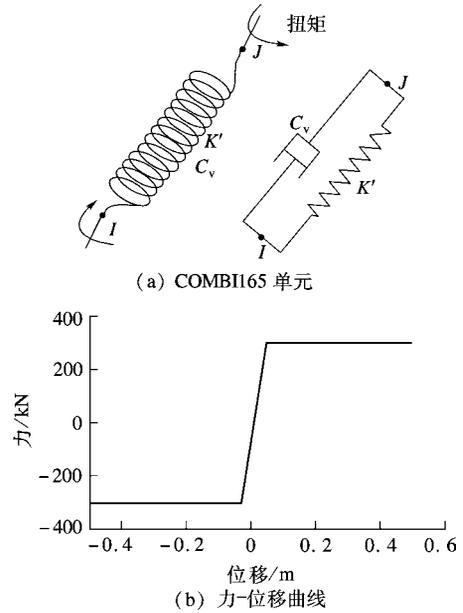


图 2 铅挤压阻尼器单元

3.2 铅挤压阻尼器布置位置及减振效果分析

以施威德勒单层网壳结构为例, 本文通过显式有限元分析软件 LS-DYNA 建立施威德勒网壳结构, 参数见表 1.

表 1 施威德勒球壳参数

径向主肋/mm	环向副肋/mm	其他杆件/mm	跨度/m	矢跨比	屋面荷载/(kN · m ⁻²)
φ150 × 5	φ120 × 5	φ100 × 5	40	1:5	1

结构采用柱子支撑, 柱子的上端铰接于网壳结构的所有边节点, 下端固结于地面, 柱子截面采用 500 mm 方柱, 高 10 m, 柱子间通过梁进行连接, 其中柱子和梁采用 C40 混凝土, 且不考虑梁柱的失效问题. 按抗震设计规范的要求, 地震波选择 El Centro 波、Taft 波及 1 条 II 类场地的人工波. 模拟过程中对结构进行三向输入, 输入的地震波时长选择为 20 s, 地震波加速度峰值分别为 2.4, 4.0 和 6.2 m/s².

为了考察不同位置对大跨空间网壳结构减振效果的影响, 首先对施威德勒网壳结构的模型进行屈曲分析. 分析结果发现, 最先失稳的区域是环向周边的 2 排杆件处. 因此针对这种情况, 在模拟的过程中铅挤压阻尼器采用了 3 种不同的布置方式: ① 交叉支撑. 在所有柱子之间采用交叉的形式支撑, 铅挤压阻尼器上端铰接于网壳结构的边节点上, 下端铰接于梁柱节点上, 如图 3(a) 所示. ② 斜撑. 所有的铅挤压阻尼器上端铰接在网壳结构的第 3 排节点(由外向内)上, 下端铰接于梁柱节点上, 如图 3(b) 所示. ③ 混合支撑. 铅挤压阻尼器的数量不变, 其中 12 个选择交叉支撑布置, 另外 12 个

选择斜撑布置, 如图 3(c) 所示. 所有布置方式均沿环向对称.

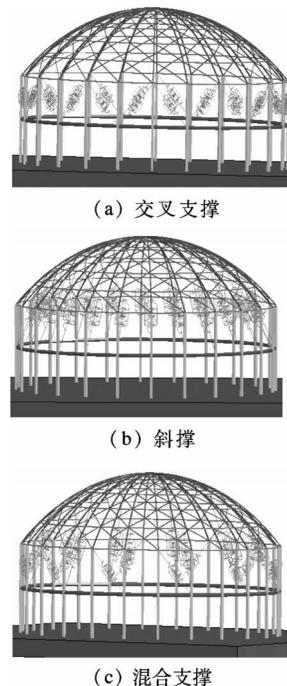


图 3 铅挤压阻尼器在施威德勒网壳结构中的布置

在模拟的过程中,选择网壳结构的顶点作为参考点,计算减振效果如下:

$$e = \frac{|S_w|_{\max} - |S_y|_{\max}}{|S_w|_{\max}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, S_w 为无控结构地震响应; S_y 为有控结构地震响应.

图 4 ~ 图 6 为加速度 4.0 m/s^2 的 Taft 波对大跨空间施威德勒网壳结构三向输入,铅挤压阻尼器 3 种不同布置的情况下,结构顶点位移和加速度减振时程对比图.

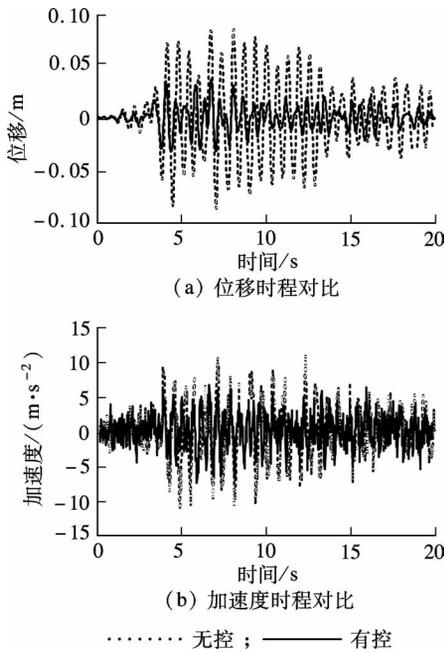


图 4 交叉支撑布置的顶点时程对比

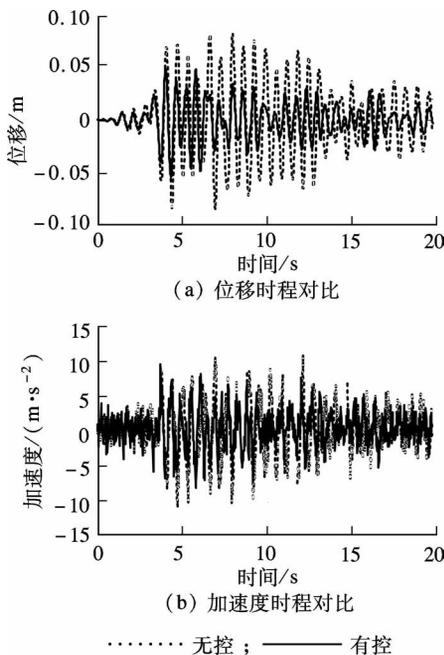


图 5 斜撑布置的顶点时程对比

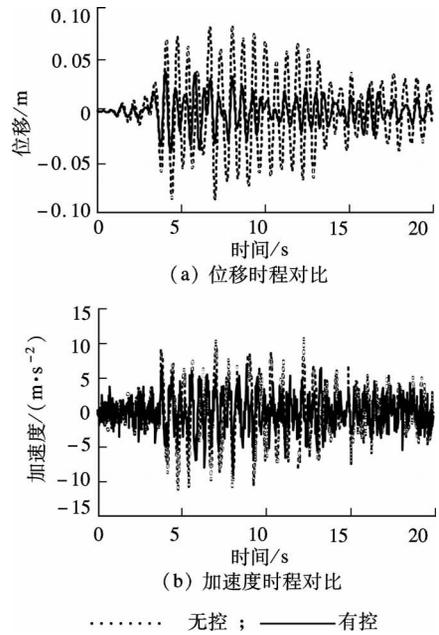


图 6 混合支撑布置的顶点时程对比

由图 4 ~ 图 6 可见,相同数量(24 个)条件下,在交叉支撑布置铅挤压阻尼器时,结构顶点最大位移峰值降低了 62.6%,最大加速度峰值降低了 33.0%;在斜撑布置铅挤压阻尼器时,结构顶点最大位移峰值降低了 41.1%,最大加速度峰值降低了 23.7%;在混合支撑布置铅挤压阻尼器时,结构顶点最大位移峰值降低了 53.2%,最大加速度峰值降低了 35.4%.由此可见交叉支撑布置对位移的减振最为有利,其原因在于大跨网壳结构相邻柱子交叉节点之间位移最大,铅挤压阻尼器能够充分发挥作用;而混合支撑布置对加速度的减振效果最理想,原因在于铅挤压阻尼器的一端铰接在壳体结构节点之上,对壳体结构的稳定发挥了重要作用.但由于铅挤压阻尼器刚度较大,3 种不同的布置都会引起加速度峰值局部增大.

施威德勒网壳结构在 El Centro 波、Taft 波和人工波作用下,当铅挤压阻尼器布置于不同位置且加速度峰值不同时,结构在 x 方向的位移减振效果见表 2,加速度减振效果见表 3.

表 2 x 方向位移减振效果

地震波	加速度峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	%		
		交叉支撑	斜撑	混合支撑
El Centro 波	2.4	53.5	9.4	43.8
	4.0	52.0	24.8	43.2
	6.2	52.9	24.5	43.0
Taft 波	2.4	60.5	33.8	51.5
	4.0	62.6	41.1	53.2
	6.2	60.5	33.8	51.4
人工波	2.4	66.5	45.2	57.9
	4.0	66.5	45.2	60.0
	6.2	66.0	44.4	57.2

表3 x方向加速度减振效果 %

地震波	加速度峰值/ ($m \cdot s^{-2}$)	交叉支撑	斜撑	混合支撑
El Centro 波	2.4	11.7	28.9	41.8
	4.0	9.0	0.8	12.3
	6.2	9.0	2.1	12.6
Taft 波	2.4	27.5	20.1	26.6
	4.0	33.0	23.7	35.4
	6.2	42.2	30.2	36.5
人工波	2.4	23.7	26.2	26.6
	4.0	38.2	39.5	34.3
	6.2	44.9	35.9	41.9

对大量算例进行分析总结,结果表明:对大跨空间网壳结构而言,不同的布置方式和不同的地震波对铅挤压阻尼器减振系统的减振效果有较大的影响.从位移的角度出发,布置位置相同、地震波加速度峰值不同的情况下,铅挤压阻尼器减振系统的减振效果较稳定,但加速度的减振效果随着地震波峰值的增加而增大.从加速度的角度出发,混合支撑布置的减振效果较好,且这种布置方式对减小地震波对网壳结构的破坏作用最有利.综合考虑位移和加速度的减振效果,混合支撑的布置方式既能有效地降低位移时程响应,又能减小地震波对网壳结构的破坏作用,显然更为合理.

3.3 铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网壳结构倒塌的影响

近年来,8度及以上的地震频发,尤其日本2011年3月11日在东北海域发生的9度巨震,实测地震加速度峰值接近 $30 m/s^2$,结构在巨震作用下的倒塌必将成为今后结构研究的热点问题之一.为了研究铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网壳结构倒塌模式的影响,仍以施威德勒网壳结构为例,参考IDA的分析方法^[12-13],对El Centro波的峰值加速度按照一定的比例进行调幅,然后通过三向输入调幅过的每一条地震波,对结构进行时程分析,得到在该地震波作用下结构在倒塌过程中各种状态所对应的临界加速度峰值,其中地震波的调幅基础为 $6.2 m/s^2$ (9度罕遇地震).通过分析得到,无铅挤压阻尼器减振系统的大跨空间网壳结构(参数见表1)在倒塌的过程中分别经历了动力局部失稳、动力环状整体失稳和动力整体倒塌^[14],其对应的地震波峰值加速度分别为 $25.9, 31.5$ 和 $63.0 m/s^2$,图7(a)~(c)为网壳结构在倒塌过程中所经历的不同状态.而对于有铅挤压阻尼器减振系统的大跨空间网壳结构(24个铅挤压阻尼器混合支撑布置),通过IDA分析发现,网壳结构在倒塌之前没有出现明显的动力局部失稳和动力整体失稳;当峰值加速

度达到 $84.0 m/s^2$ 时,网壳结构周边才出现大量杆件的失效,造成网壳结构逐渐向一侧倾斜直至倒塌,如图7(d)所示.

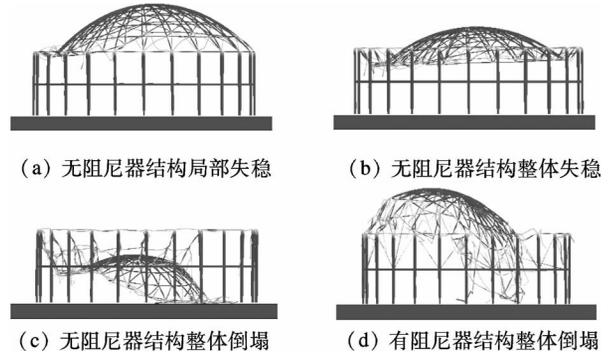


图7 施威德勒网壳结构动力倒塌对比

由IDA分析结果可知,铅挤压阻尼器减振系统明显地提高了大跨空间网壳结构对地震波破坏作用的抵抗能力,尤其对大跨空间网壳结构倒塌临界荷载有明显的提高.通过数据分析可知,整体倒塌临界荷载提高了0.33倍.

4 结论

- 1) 在相同的铅挤压阻尼器数量下,不同的布置位置对网壳结构的减振效果有一定的影响.
- 2) 铅挤压阻尼器位置布置合理的情况下,减振系统既可以降低结构的位移时程响应,又可以有效地减小地震波对结构的破坏作用.
- 3) 铅挤压阻尼器减振系统可以明显地提高大跨空间网壳结构在强震下的抗倒塌能力,对于本文中的施威德勒网壳结构,整体倒塌临界荷载可以提高0.33倍.

参考文献 (References)

- [1] Bel Hadj Ali N, Smith I. Dynamic behavior and vibration control of a tensegrity structure [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, **47**(9): 1285-1296.
- [2] Aida T, Aso T. Vibration control of shallow shell structures using a shell-type dynamic vibration absorber [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, **218**(2): 245-267.
- [3] 瞿伟廉,徐幼麟. ER/MR智能阻尼器对空间网壳结构地震反应的半主动控制[J]. *地震工程与工程振动*, 2001, **21**(4): 24-31.
Qu Weilian, Xu Youlin. Semi-active control for earthquake responses of reticulated shells with ER/MR smart dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, **21**(4): 24-31. (in Chinese)

- [4] 高博青,董石麟. 折板式网壳结构的抗震及减震研究 [J]. 浙江大学学报:理学版,2002,29(5):589-594.
Gao Boqing, Dong Shilin. Study on a seismic and shock absorption of folded plate latticed shell [J]. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2002, **29**(5): 589-594. (in Chinese)
- [5] 范峰,沈世钊. 网壳结构的粘弹阻尼器减振分析[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(3):156-159.
Fan Feng, Shen Shizhao. Vibration reducing analysis and experimental study of viscous damper on reticulated shells [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, **23**(3): 156-159. (in Chinese)
- [6] 沈世钊. 大跨空间结构理论研究和工程实践[J]. 中国工程科学,2001,3(3):34-41.
Shen Shizhao. Theoretical study and engineering practice of long-span spatial structures [J]. *Engineering Science*, 2001, **3**(3): 34-41. (in Chinese)
- [7] 徐赵东,李爱群,叶继红. 大跨空间网壳结构减震控制的研究与发展[J]. 振动与冲击,2005,24(3):59-61.
Xu Zhaodong, Li Aiqun, Ye Jihong. Study and development on earthquake mitigation control of long-span spatial reticulated shell structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, **24**(3): 59-61. (in Chinese)
- [8] 叶继红,陈月明,沈世钊. TMD 减震系统在网壳结构中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2000,33(5):10-14.
Ye Jihong, Chen Yueming, Shen Shizhao. The present situation of seismic vibration control of reticulated shell structures using TMD system [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2000, **33**(5): 10-14. (in Chinese)
- [9] 全希坤,李宏男,曹勇,等. 减震控制技术在网壳结构中的研究与发展 [J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(5):745-748.
Quan Xikun, Li Hongnan, Cao Yong, et al. Study and development of earthquake mitigation control of long-span spatial reticulated shell structure [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2006, **22**(5): 745-748. (in Chinese)
- [10] Robinson W H, Greenbank L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1976, **4**(3): 251-259.
- [11] 杨军. 铅挤压阻尼器的研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(6):115-117.
Yang Jun. Study of lead extrusion damper [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science*, 2006, **34**(6): 115-117. (in Chinese)
- [12] Asgarian Behrouz, Sadrinezhad Arezoo. Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, **66**(2): 178-190.
- [13] Zarfam Panam, Mofid Massood. Evaluation of modal incremental dynamic analysis, using input energy intensity and modified bilinear curve [J]. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009, **18**(5): 573-586.
- [14] Samuel Tan. Cable-based retrofit of steel building floors to prevent progressive collapse [D]. Berkeley, USA: University of California in Berkeley, 2003.